

## 2013 年度 理工学研究科

## 博士学位請求論文（要旨）

## MEMS センサを用いた水の孤立気泡沸騰熱伝達メカニズムの解明

学位請求者 機械工学専攻  
矢吹 智英

## 1. 研究の背景と目的

本研究では沸騰現象の最小単位である孤立気泡沸騰における熱伝達メカニズムを温度計測に高い時空間分解能をもつ MEMS センサを用いて調べた。ここで、沸騰熱伝達メカニズムの解明とは「沸騰現象において、どこで、どの時間に、どのくらいの熱が、どのような形態で輸送されるのかを明らかにすること」と定義した。

沸騰熱伝達是对流熱伝達、ふく射伝熱などの他の伝熱形態と比較して非常に高い熱伝達性を有するため、工業的にはヒートポンプ空調機器内の蒸発器、ヒートパイプの蒸発部、製鋼業における金属の焼き入れ、発電所の蒸気生成、原子炉のシビアアクシデントにおける冷却技術等に広く利用されている。近年では高発熱密度化が進み、単相對流熱伝達の除熱限界を超える超高集積電子回路や、高出力レーザー、電気自動車およびハイブリッド自動車用パワー半導体の冷却に沸騰熱伝達を利用しコンパクトな熱交換機を開発しようという動きが高まっている。産業における沸騰熱伝達利用の広まりと並行して 80 年近くにわたって沸騰の基礎・応用研究が実験、解析、数値的手法によりなされてきた。その中で、単一の沸騰気泡にかかわる伝熱現象としてマイクロ液膜の蒸発、三相界線伝熱、ドライアウト領域のリウエットング、気泡運動が誘起する強制対流熱伝達などが提唱されてきた。しかしながら、界面熱輸送や核生成のような分子の動力学が密接に関連した現象を除いても沸騰が内包する伝熱素現象は時間的にはマイクロ秒からミリ秒、空間的にはナノメートルからミリメートル程度と非常に小

さな時空間スケールで生じるために、従来計測技術では分解能の不足によって詳細な計測が難しく、大半の従来研究が沸騰熱伝達の時空間平均的な状態に迫るにとどまっている。これが主たる要因となって沸騰熱伝達メカニズムにはいまだ不明な点が残されている。将来的な、熱伝達性、制御性に優れた高性能沸騰伝熱面の創製や数値計算による沸騰熱伝達予測技術の向上には沸騰熱伝達メカニズムの正しい理解が不可欠であるといえる。

一方近年、MEMS センサや高速度赤外線カメラ、感温液晶などの高時空間分解能を持った計測技術の登場によって沸騰を詳細に計測することが可能となってきた。また、計算機や数値計算技術の発展を背景に、近年、沸騰熱伝達メカニズムを直接数値計算で調べる研究も行われてきている。

工業においては沸騰様相が複雑な高熱流束域の沸騰熱伝達特性が重要視されるが問題が複雑化して伝熱素過程のメカニズムが隠れてしまうことは望ましくない。そのため本研究ではまず、計測する温度や伝熱量と伝熱素過程の対応関係が明確である流動が無いプール沸騰における孤立気泡域を対象にして、伝熱メカニズムを調べることを目的とした。さらに、本研究では熱交換器の冷媒としての用途が広い一方でマイクロスケールの実験データが少ない自然冷媒である水を沸騰媒体として選択することとした。沸騰熱伝達メカニズムに対するアプローチ手法としては沸騰研究用に開発した MEMS センサを用いて壁面温度を高速計測し、計測温度を用いた伝熱解析を通じて種々の伝熱特性を評価する。主な研究項目は単一気泡の発生に伴って生じる伝熱

現象の特定，局所熱流束の評価，壁面熱輸送における支配的な伝熱メカニズムの特定であり，さらに，研究の過程で気泡下に形成されるマイクロ液膜が極めて高い熱流束を輸送し壁面熱輸送において支配的な伝熱メカニズムであることが明らかとなったため，マイクロ液膜蒸発の気泡成長に対する寄与やマイクロ液膜初期厚さの空間的な分布，液膜形成特性を調べた。

また，マイクロ液膜の蒸発が系の熱伝達性を大きく左右すると考えられ熱交換器として工業的な利用が期待されるミニチャンネル内沸騰を対象とした実験を行い，主にマイクロ液膜の形成およびドライアウト特性を調べた。

## 2. 論文の構成ならびに各章の要約

### 第1章 序論

はじめに本研究の背景を述べて沸騰熱伝達機構を研究する意義を明確にし，次に本研究において計測対象となりうる沸騰の伝熱素過程を説明した。また，沸騰熱伝達機構に関する先端的な研究に触れ本研究の位置づけを明らかにした。最後に本研究の目的と構成を記述した。

### 第2章 孤立気泡下の局所伝熱面温度計測

第2章ではまず使用するMEMSセンサの諸元およびセンサを組み込んだ計測システムについて説明した。次に実験の結果観察された気泡の成長特性を整理した。次に飽和沸騰およびサブクール沸騰において計測した壁面温度データを詳細に観察した。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 飽和条件，サブクール条件にかかわらず壁面温度データからは気泡下のマイクロ液膜の蒸発，ドライアウト，ドライアウト領域のリウエットングが明瞭に観察された。
- ・ 高速局所の伝熱現象の検出に成功したことから，沸騰のような時空間スケールの小さな伝熱現象の計測に対するMEMS熱センシング技術の有効性が確かめられた。

### 第3章 孤立気泡沸騰の熱伝達機構

第3章では第2章で計測した壁面温度を境界条件とするセンサ基板内の非定常熱伝導解析を通じて壁面伝熱量を定量化し種々の伝熱特性を調べた。本章で得られた主な知見は以下の通りである。

- ・ マイクロ液膜の蒸発時には  $1\text{MW/m}^2$  を超える高熱流束が

生じ，各過熱度条件における最大熱流束は発泡点近くほど，過熱度が高いほど大きくなる。

- ・ 水の孤立気泡沸騰における壁面熱輸送ではマイクロ液膜の蒸発が支配的な伝熱メカニズムである。
- ・ マイクロ液膜蒸発の気泡成長に対する寄与は過熱度によらず約50%である。気泡内潜熱の残りの約50%は気泡周囲の過熱液から供給されたこととなる。
- ・ 気泡離脱後には強制対流熱伝達による伝熱促進が熱伝達率の増加として確認され，本実験条件では気泡ヌセルト数は気泡レイノルズ数とともに増加し，20~40の範囲の値となった。

## 第4章 マイクロ液膜の形成特性と伝熱特性

第4章では局所熱流束からマイクロ液膜初期厚さを算出し，液膜の形成機構を調べるとともに実験相関式を提案した。また，マイクロ液膜と気泡内蒸気間の気液界面熱抵抗を実験及び解析結果を用いて算出した。得られた知見は以下の通りである。

- ・ マイクロ液膜初期厚さを発泡点からの距離  $r$  [mm] をパラメータとする以下の実験相関式にまとめた。

$$\delta_0 = 4.34 \times r^{0.69} \quad [\mu\text{m}]$$

- ・ ボント数  $Bo \geq 15$  の液膜形成速度が比較的早い条件では，液膜形成速度が大きく壁面上に発達した粘性境界層が薄いほど液膜初期厚さは薄くなり，粘性境界層モデルによって液膜形成特性が説明される。
- ・ ボント数  $Bo < 15$  の液膜形成速度が比較的遅い条件では動的メニスカスにおける慣性力，粘性力，表面張力を考慮した運動量のバランスによって液膜形成特性が説明される。
- ・  $Bo \geq 15$  の領域では粘性境界層厚さモデルを， $Bo < 15$  の領域では動的メニスカスモデルを適用し，90%以上の実験データを誤差 $\pm 30\%$ 以内で予測できる無次元マイクロ液膜初期厚さの実験相関式を作製した。

$$\frac{\delta_0}{r} = \frac{0.337\sqrt{v_{t_g}}}{r} \quad (Bo \geq 15)$$

$$\frac{\delta_0}{r} = 4.13 \times 10^{-2} Ca^{0.33} We^{-0.0373} \quad (Bo < 15)$$

- ・ 壁面温度の計測誤差 $\pm 1^\circ\text{C}$ を考慮して算出された気液界面熱抵抗は  $10^7\text{m}^2\text{K/W} \sim 10^6\text{m}^2\text{K/W}$  程度と幅を持つ

が、 $1\text{MW/m}^2$  を超える高い蒸発熱流束が生じるマイクロ液膜の界面はこの界面熱抵抗により  $2\text{K}$  程度過熱していることが示された。

## 第5章 ミニチャネル内沸騰におけるマイクロ液膜特性

プール沸騰実験においてMEMS センサが沸騰研究に対して有用であることが示され、また、マイクロ液膜が  $1\text{MW/m}^2$  を超える高熱輸送を担いうる現象であることが明らかとなったのを背景に、マイクロ液膜が伝熱特性を強く左右すると予測されるミニチャネル内の沸騰を対象に壁面温度計測実験および伝熱量評価を行いマイクロ液膜の形成、ドライアウト特性を調べた。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 壁面温度、気泡挙動の撮影結果、壁面熱流束の比較によって、ミニチャネル内の単一気泡沸騰は液単相流伝熱、気泡周囲の蒸発温度境界層における過渡熱伝導、マイクロ液膜の蒸発、ドライアウト、リウエットイングから構成されていることがわかった。
- ・ 液膜初期厚さとドライアウトに至るまでの液膜蒸発厚さの差、および液膜挙動の観察結果から液膜の撥水型ドライアウト機構の存在を明らかとした。撥水型ドライアウトは高い熱伝達率が生じるマイクロ液膜蒸発期間

を短くするだけでなく、大きな熱伝達率の低下をもたらす。そのため、ミニ・マイクロチャネル沸騰熱交換機の製作に当たっては壁面の濡れ性や表面粗さ、流体内の不純物に気を配り、可能な限り液膜を破断しにくくし、破断した場合でもドライパッチ拡大速度を遅くする工夫が必要であると言える。

- ・ 液膜初期厚さは液膜形成速度が大きいほど厚くなることが示され、また、液膜初期厚さが厚いほど液膜が破断しにくいもしくはドライパッチの拡大速度が遅くなる傾向が観察された。

## 第6章 結論

第6章では本研究で得られた知見をまとめ、加えて今後の展望も述べた。

本研究では沸騰が内包する伝熱素過程を定量的に明らかとすることに成功した。得られた知見は沸騰の数値計算技術の構築や、沸騰の制御により高熱伝達性を実現する新しい熱交換技術の創製のために重要な情報であると考えている。